Thesis Title Stress-Strain Relationship of Left Ventricular Myocardium

Author Ms. Tipapon Khamdaeng

Degree Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering)

Thesis Advisory Committee

Prof. Dr. Pradit Terdtoon Advisor

Asst. Prof. Dr. Phrut Sakulchangsatjatai Co-advisor

Asst. Prof. Dr. Sansanee Auephanwiriyakul Co-advisor

ABSTRACT

The dysfunction of the left ventricular (LV) wall causes the death of a large amount of people worldwide each year. One of the most dangerous diseases is heart attack originated by ischemia which results in damage of LV myocardium due to insufficient blood supply from coronary arteries, thus, changing of its mechanical properties need to be determined in order to specify some indices for diagnosis in clinical treatment. These indices were determined based on the understanding of stress-strain relationship of both healthy and diseased heart.

A thick-walled truncated conical shell geometry was employed and LV myocardium was assumed to be transversely isotropic, incompressible and with a homogeneous deformation. The LV myocardial mechanics model incorporated the active (Hunter *et al.*, 1998) and passive transversely isotropic constitutive relations (Humphrey *et al.*, 1990) in terms of a new polynomial form of pseudostrain-energy function (W) with the optimized *in-vivo* myocardial material parameters. Finite

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

deformations including inflation, extension, twist and transmural shearing were considered in the model. The deformations parameters can be calculated at any single radial location in the LV myocardium using a method proposed by Humphrey and Yin (1989) while the material parameters were assumed not to vary across the wall. *In-vivo* invasive assessment using pressure catheter and ultrasound crystals, i.e. sonomicrometers, was conducted in a mongrel male dog, weighing about 27.6 kg, to determine LV pressure and LV myocardial deformation, respectively. The regional stress and strain were respectively calculated based on the thick-walled theory and the movement of the tetrahedron-shaped crystals implanted at an anterior-lateral wall region of LV myocardium.

Transmural stress and strain distributions from base to apex in the normal and graded ischemic canine heart progressively induced by left anterior descending (LAD) coronary flow reduction during systolic and diastolic phases over cardiac cycle have been determined. It was found from calculation that all six components of strain were functions of radius, whereas, just three components of stress were functions of radius (i.e. component of radial stress and two components of transmural shearing stress). Moreover, stresses and strains relation is nonlinear due to fiber orientation changing across the LV wall. The radial stresses decreased monotonically from inner to outer surface resulting from pressure acting on inner to outer LV wall. The circumferential, axial, and in-plane shearing stresses showed the complicated transmural distributions. The radial, circumferential, axial, and three shearing strains exhibited opposite deformation occurred at 80% and 100% LAD coronary occlusion levels in early-systole. The normal myocardium undergoes wall thickening, systolic shortening, and right-handed torsion; in contrast, the graded ischemic canine heart at 80% and 100%

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

LAD coronary occlusion levels undergoes wall thinning, systolic stretching, and left-handed torsion.

In conclusion, the stress-strain relationships over cardiac cycle predicted from the present model showed good agreement (mean square error of 0.0799 kPa^2 and 0.1258 kPa^2 during systolic and diastolic phases, respectively) with those derived from *in-vivo* experiment in six different LAD coronary occlusion levels of canine heart. Therefore, the *in-vivo* regional stress-strain relationship demonstrated by the transversely isotropic constitutive relations in terms of a new polynomial form of W containing eight material parameters can reliably characterize resulting in better detection of myocardial ischemia.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้าย

ผู้เขียน นางสาวทิพาพร คำแดง

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์ ดร. ประดิษฐ์ เทอดทูล	อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พฤทธ์ สกุลช่างสัจจะทัย	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศันสนีย์ เอื้อพันธ์วิริยะกุล	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

บทคัดย่อ

โรคการทำงานผิดปกติของหัวใจห้องล่างซ้ายเป็นสาเหตุของการเสียชีวิตของประชากรทั่วโลกเป็นจำนวนมากในแต่ละปี โรคหนึ่งที่ร้ายแรงที่สุดก็คือโรคกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดซึ่งทำให้กล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายในชั้นไมโอคาร์เดียมเกิดความเสียหายเนื่องจากเลือดที่ส่งมาหล่อเลี้ยงทางเส้นเลือดโคโรนารี่มีไม่เพียงพอ ดังนั้นจากความเสียหายของกล้ามเนื้อหัวใจที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องศึกษาสมบัติเชิงกลของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายเพื่อหาดัชนีที่เป็นประโยชน์ในการวินิจฉัยโรคในการรักษาทางการแพทย์ การหาดัชนีเหล่านี้ต้องอาศัยความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของกล้ามเนื้อหัวใจทั้งในกรณีที่หัวใจมีการทำงานแบบปกติและแบบไม่ปกติอันเนื่องมาจากการเกิดโรค

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปทรงโคนปลายตัดเพื่อแทนรูปทรงทางเรขาคณิตของหัวใจห้องล่างซ้ายและสมมติให้กล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายมีการเสียรูปแบบทรานสเวิร์สลี่ ไอโซทรอปิก ไม่สามารถอัดตัวได้ และเป็นเนื้อเดียวกัน แบบจำลองกลไกของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายประกอบด้วยสมการคอนสติติวทีฟของกล้ามเนื้อหัวใจที่บ่งบอกถึงการเสียรูปแบบทรานสเวิร์สลี่ไอโซทรอปิกในขณะบีบตัว (ฮันเตอร์และคณะ, 1998) และคลายตัว (ฮัมฟรีย์และคณะ, 1990) โดย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สามารถเขียนอยู่ในเทอมของฟังก์ชั่นพลังงานความเครียดเสมือน (*W*) แบบโพลิโนเมียลแบบใหม่ที่มีค่าตัวแปรทางวัสดุของกล้ามเนื้อหัวใจที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบจากภายในร่างกายขณะที่ยังมีชีวิตอยู่ แบบจำลองได้รวมการเสียรูปแบบจำกัดที่มีการพองตัว การยืดออก การบิด และการเฉือนข้ามผ่านผนัง ตัวแปรการเสียรูปต่าง ๆ สามารถคำนวณได้ที่ตำแหน่งใด ๆ ในทิศทางตามแนวรัศมีของกล้ามเนื้อหัวใจโดยใช้วิธีที่ได้นำเสนอโดยฮัมฟรีย์และยิน (1989) โดยสมมติให้ค่าตัวแปรทางวัสดุของหัวใจห้องล่างซ้ายไม่มีการเปลี่ยนแปลงข้ามผ่านผนัง วัดค่าความดันและการเสียรูปของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายที่เกิดขึ้นภายในร่างกายของสุนัขเพศผู้พันธุ์ทางน้ำหนักประมาณ 27.6 กิโลกรัมในขณะที่ยังมีชีวิตอยู่โดยใช้หัววัดความดันและผลึกแบบอัลตราซาวนด์หรือโซโนไมโครมิเตอร์ ตามลำดับ และสามารถคำนวณค่าความเค้นและความเครียดได้โดยพิจารณาจากทฤษฎีผนังหนาที่ได้รับภาระความดันและการเคลื่อนที่ของผลึกที่ฝังเป็นรูปทรงสี่หน้าในผนังของหัวใจบริเวณแอนเทอริเออเลทเทอรอล ตามลำดับ

ทำการหาการกระจายค่าความเค้นและความเครียดจากฐานไปสู่ปลายแหลมของหัวใจห้องล่างซ้ายของสุนัขในสภาวะการทำงานปกติและสภาวะหัวใจขาดเลือดที่ถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการบีบเส้นเลือดเลฟแอนเทอริเออเดสเซนดิ้งโคโรนารี่ให้ตีบตันไปเรื่อย ๆ ระหว่างช่วงการบีบตัวและคลายตัวของหัวใจในหนึ่งรอบวัฏจักร จากการคำนวณพบว่าค่าความเครียดทั้งหกค่าเป็นฟังก์ชั่นของรัศมี แต่อย่างไรก็ตาม มีค่าความเค้นเพียงสามค่าเท่านั้นที่เป็นฟังก์ชั่นของรัศมี (กล่าวคือ ความเค้นในทิศทางตามแนวรัศมีและความเค้นสองค่าในทิศทางตามแนวเฉือนข้ามผ่านผนัง) ยิ่งไปกว่านั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นแบบไม่เชิงเส้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวของเส้นใยที่เปลี่ยนแปลงข้ามผ่านผนัง ค่าความเค้นในทิศทางตามแนวรัศมีค่อย ๆ ลดลงในทิศทางตามแนวข้ามผ่านผนังจากผนังด้านในไปสู่ผนังด้านนอกซึ่งเป็นผลจากภาระความดันที่กระทำต่อผนังของหัวใจห้องล่างซ้าย ค่าความเค้นในทิศทางตามแนวเส้นรอบวง ค่าความเค้นในทิศทางตามแนวแกน และค่าความเค้นเฉือนในทิศทางตามแนวระนาบแสดงการกระจายตัวข้ามผ่านผนังที่ซับซ้อน ในช่วงต้นของการบีบตัวของหัวใจห้องล่างซ้ายที่มีสภาวะการขาดเลือดที่ระดับการอุดกั้นเส้นเลือดเลฟแอนเทอริเออเดสเซนดิ้งโคโรนารี่ 80 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความเครียดในทิศทางตามแนวรัศมี ค่าความเครียดในทิศทางตามแนวเส้นรอบวง ค่าความเครียดในทิศทางตามแนวแกน และค่าความเครียดเฉือนในทั้งสามทิศทางแสดงการเสียรูปในลักษณะตรงข้ามกันกับหัวใจที่มีสภาวะปกติ ในหัวใจที่มีสภาวะปกติผนังของหัวใจจะหนาขึ้น หดตัวลงตามแนวแกน และบิดตัวไปทางขวามือ ในทางกลับกันกับหัวใจที่มีสภาวะการขาดเลือดที่ระดับการอุดกั้นเส้นเลือดเลฟแอนเทอริเออเดสเซนดิ้งโคโรนารี่ 80 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ ผนังของหัวใจจะบางลง ยืดตัวออกตามแนวแกน และบิดตัวไปทางซ้ายมือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ค่าความเค้นและความเครียดในหนึ่งรอบวัฏจักรที่ทำนายได้จากแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดมีความสอดคล้องที่ดี (ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 0.0799 กิโลปาสคาลยกกำลังสองและ 0.1258 กิโลปาสคาลยกกำลังสอง ในช่วงระหว่างการบีบตัวและคลายตัวของหัวใจ ตามลำดับ) กับค่าความเค้นและความเครียดที่ได้มาจากการทดสอบในหัวใจห้องล่างซ้ายของสุนัขขณะที่ยังมีชีวิตอยู่ที่มีสภาวะการขาดเลือดที่ระดับการอุดกั้นเส้นเลือดเลฟแอนเทอริเออเดสเซนดิ้งโคโรนารี่ที่แตกต่างกันหกระดับ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดที่ตำแหน่งใด ๆ ของกล้ามเนื้อชั้นไมโอคาร์เดียมของหัวใจห้องล่างซ้ายที่วัดได้ภายในร่างกายขณะที่ยังมีชีวิตอยู่ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการคอนสติติวทีฟที่บ่งบอกถึงการเสียรูปแบบทรานสเวิร์สลี่ ไอโซทรอปิก ที่เขียนอยู่ในเทอมของ W แบบโพลิโนเมียลแบบใหม่ที่มีตัวแปรทางวัสดุของกล้ามเนื้อหัวใจแปดค่า สามารถแสดงลักษณะเฉพาะทำให้สามารถบ่งบอกการเกิดของโรคกล้ามเนื้อหัวใจขาดเลือดในชั้นไมโอคาร์เดียมได้ดียิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved